

SPST C³ MOS ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ С ЁМКОСТНОЙ СВЯЗЬЮ КОНТАКТОВ НА AlGaN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

© А. С. Адонин, И. М. Аболдуев, А. Ю. Евграфов, В. М. Миннебаев,
А. В. Перевезенцев

ОАО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Рассмотрены особенности SPST СВЧ переключателя, изготовленного по C³MOS технологии на AlGaN/GaN гетероструктурах с использованием high-K диэлектрика и контактов с ёмкостной связью. Представлены результаты измерений параметров переключателя в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: СВЧ переключатель, C³MOS технология, high-K диэлектрик

Сведения об авторах: Адонин Алексей Сергеевич, д.т.н., adonin@pulsarnpp.ru; Аболдуев Игорь Михайлович, к.т.н., mail6@pulsarnpp.ru; Евграфов Александр Юрьевич, аспирант, evgrafov@pulsarnpp.ru; Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н., mail6@pulsarnpp.ru; Перевезенцев Александр Владимирович, к.т.н., post6@pulsarnpp.ru

AlGaN/GaN SPST C³ MOS SWITCH WITH CAPACITIVELY COUPLED CONTACTS

A. S. Adonin, I. M. Abolduev, A. Yu. Evgrafov, V. M. Minnebaev, A. V. Perevezentsev

JCS «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

The characteristics of AlGaN/GaN microwave SPST switch based on C³MOS technology using high-K dielectric and capacitively coupled contacts were analyzed in this research. The results of of switch parameters measurement in wide frequency range are presented.

Keywords: microwave switch, C³MOS technology, high-K dielectric

Data of authors: Adonin Aleksey Sergeevich, Sc.D., adonin@pulsarnpp.ru; Abolduev Igor Mikhailovich, Ph.D., mail6@pulsarnpp.ru; Evgrafov Aleksandr Yurievich, postgraduate, evgrafov@pulsarnpp.ru; Minnebaev Vadim Minkhatovich, Ph.D., mail6@pulsarnpp.ru; Perevezentsev Aleksandr Vladimirovich, Ph.D., post6@pulsarnpp.ru

Введение

СВЧ переключатели различных типов (SPST, SPDT, SP3T и др.) являются одними из важных элементов многих радиотехнических устройств, таких как системы связи и радары на основе антенн с активными фазированными решётками. РЧ и СВЧ переключатели необходимы в цепях управления фазовыми и амплитудными состояниями приёмных и передающих трактов, а также при подключении приёмных и передающих трактов к излучающим элементам [1].

Современным системам беспроводной связи и радиолокации требуются переключатели с низкими потерями при высокой переключаемой СВЧ мощности с высокой линейностью, низким энергопотреблением и широким диапазоном рабочих температур. Как следует из табл. 1 [2], в настоящее время ни одна из существующих технологий создания СВЧ переключателей не отвечает этим требованиям одновременно.

СВЧ переключатели на основе р-і-п диодов потребляют значительную мощность. Переключатели MEMS требуют высокого

Таблица 1

Параметры переключателей, изготовленных по различным технологиям

Switch Technology/ parameter	Monolithic PIN diode	GaAs MMICs	CMOS SOI/SOS	RF MEMS	GaN MMIC
Insertion Loss (dB)	0,3-1,5	0,3-2,5	0,3-2,5	0,1-5	0,1-1,5
Isolation (dB)	≥ 30	≥ 25	≥ 30	≥ 30	≥ 30
Power Handling (W)	≤ 50	≤ 10	≤ 50	≤ 10	≤ 100
Power Consumption	High	Low	Low	Low	Low
Switching Speed	ns to ms	ns to ms	ms	ms	ns
$R_{on} \cdot C_{off}$ (fs)	100-200	224	250 (18 m)	-	400
Cost	High	Low	SOS-Low SOI-very Low	Medium	High
ESD sensitivity	Medium	High	Low	High	Low

операционного напряжения, времена переключения ограничены несколькими микросекундами и многим из их подтипов необходимы герметичные корпуса. Переключатели, изготовленные по технологиям Si MOSFETs и GaAs HEMTs, при низких напряжениях пробоя не могут достигнуть необходимых уровней линейности. МИС на AlGaN/GaN гетероструктурах при высокой мощности переключения изготавливаются по дорогой и сложной технологии, требуют применения теплоотводящей подложки из карбида кремния, а также дополнительного формирования сквозных отверстий для уменьшения

заземляющих индуктивностей, отвода тепла и рассеивания выделяемой мощности.

Конструкция SPST переключателя

В то же время, как показано в исследованиях университета южной Каролины и фирмы SETI (Sensor Electronic Technology, Inc. США), а также в работах ОАО «НПП «Пульсар», где за последние 2 года разработана новая C^3 (Capacitively Coupled Contact) MOS технология, существует широкий класс СВЧ устройств, которые могут функционировать практически без потребления по постоянному току

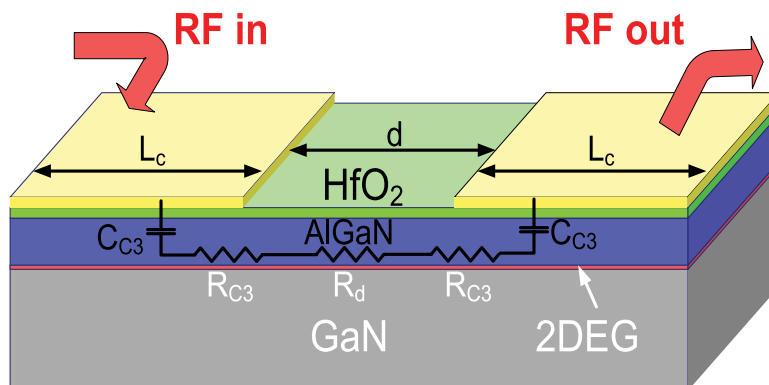


Рис. 1

Конструкция C^3 MOS СВЧ ключа

(переключатели, аттенюаторы, фазовращатели, ограничители и т.д.) [2-5]. При изготовлении управляющих СВЧ устройств на AlGaIn/GaN можно применять технологию C³ MOS, использующую ёмкостные связи между электродами и двумерным электронным газом (2DEG). На рис. 1 показан линейный C³MOS ключ, технология изготовления которого изложена в работе [6]. На поверхности AlGaIn/GaN структуры имеются два контакта, под которыми формируется слой диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью (HfO₂). Входной и выходной контакты являются верхними электродами конденсаторов, управляемых напряжением, а канал 2DEG является нижней обкладкой конденсаторов и при наличии отрицательного или положительного смещения, менее порогового, между ними возникает сильная ёмкостная парная связь, которая эффективно подключает канал 2DEG. Компонент вертикального тока является исключительно ёмкостным, а компонент горизонтального тока проходит через канал 2DEG – это обеспечивает наличие низкого импеданса между контактами.

Результаты измерений

Из C-V характеристики последовательного переключающего элемента, восстановленной по результатам измерения S-параметров, видно (рис. 2), что в диапазоне напряжений менее -5 В ёмкость мала и не зависит от напряжения. В этом диапазоне напряжений происходит истощение двумерного электронного газа под

площадь входного электрода. В диапазоне напряжений -5...+7 В наблюдается резкое увеличение ёмкости до значений ёмкости плоского конденсатора с одновременным увеличением последовательного сопротивления (рис. 3). Этот режим соответствует включению ключа. При увеличении напряжения более +7 В аналогичное переключение в выключенное состояние наблюдаем на выходном электроде второго конденсатора.

В данной работе исследованы несколько типов СВЧ МИС переключателей: переключатели SPST с последовательным переключающим элементом и SPST переключатели с дополнительным шунтированием параллельным шунтирующим элементом (рис. 4). Контроль СВЧ параметров C³MOS переключателей проводился на пластинах с помощью копланарных зондов Microtech и векторного анализатора цепей N5220A. Для оценки работоспособности СВЧ МИС при высоких температурах использовалось рабочее место, включающее копланарные зонды Microtech, векторный анализатор цепей N5220A и столик с возможностью подогрева платы с СВЧ МИС. При разогреве кристалла переключателя увеличение прямых потерь составило 0,5 дБ на 100 °С. У всех СВЧ МИС расстояние между электродами составляло 3 мкм. Ширина канала последовательных переключающих элементов составляла от 0,1 мм до 1 мм. Ширина канала шунтирующего переключающего элемента составляла 0,27 мм. Топология ключа с последовательно-параллельным соединением переключающих эле-

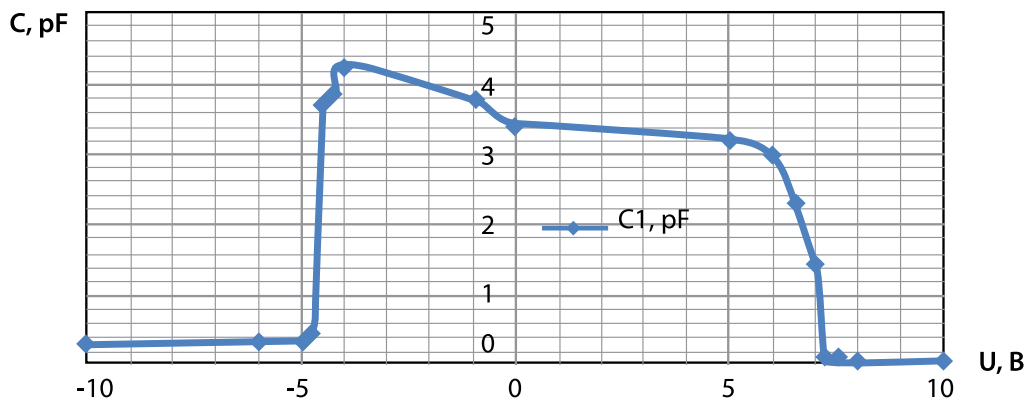


Рис. 2

C-V характеристика C³MOS переключателя

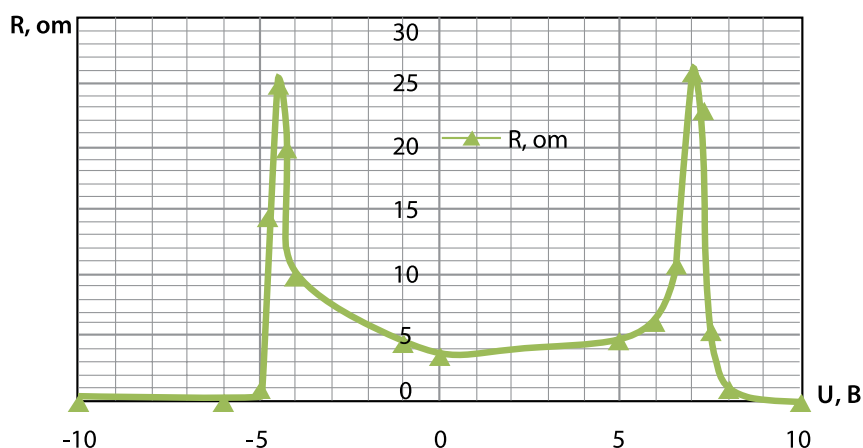


Рис. 3

Изменение последовательного сопротивления С³МOS переключателя от управляющего напряжения

ментов приведена на рис. 4. Размер СВЧ МИС с шунтом составил 0,4 мм x 0,68 мм.

S-параметры ключа с шунтированием приведены на рис. 5.

Из рис. 5а видно, что амплитудно-частотная характеристика СВЧ ключа с последовательно-параллельным соединением переключательных элементов в состоянии «включено» во всем диапазоне частот от 2 до 20 ГГц имеет входные потери менее 0,8 дБ. В состоянии «выключено» (рис. 5б) изоляция в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц составляет от 24 до 27 дБ, что приемлемо для создания переключателей устройств.

Для измерения амплитудных (мощностных) характеристик переключателей было подготовлено рабочее место, включающее копланарные зонды фирмы Microtech, век-

торный анализатор цепей N5220A с дополнительным предусилителем мощности X-диапазона частот. Максимальная переключаемая мощность ограничивалась максимально-допустимой мощностью зондового перехода – 5 Вт. Измерения амплитудной характеристики (зависимость коэффициента передачи от входной мощности) проводились на частоте 9 ГГц. Результаты измерения для последовательных переключающих элементов с шириной канала 0,5 мм и 1,0 мм и последовательно-параллельного соединения переключательных элементов 0,27 мм представлены на рис. 6.

В дальнейшем будут проведены более подробные исследования СВЧ параметров переключателей и путей повышения мощности переключения.

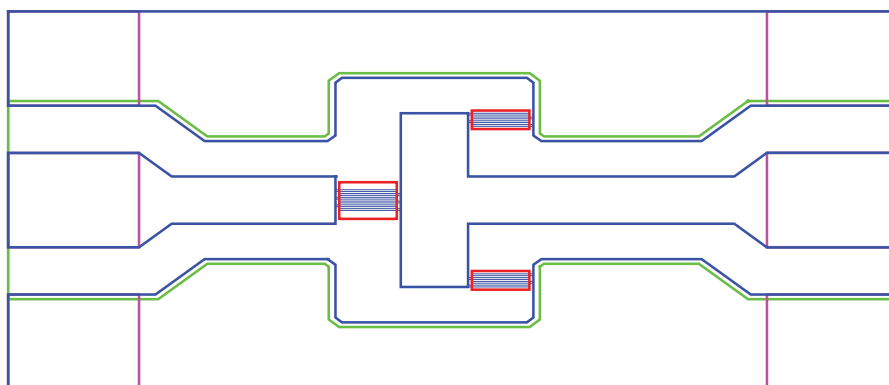


Рис. 4

Топология ключа с последовательно-параллельным соединением переключательных элементов

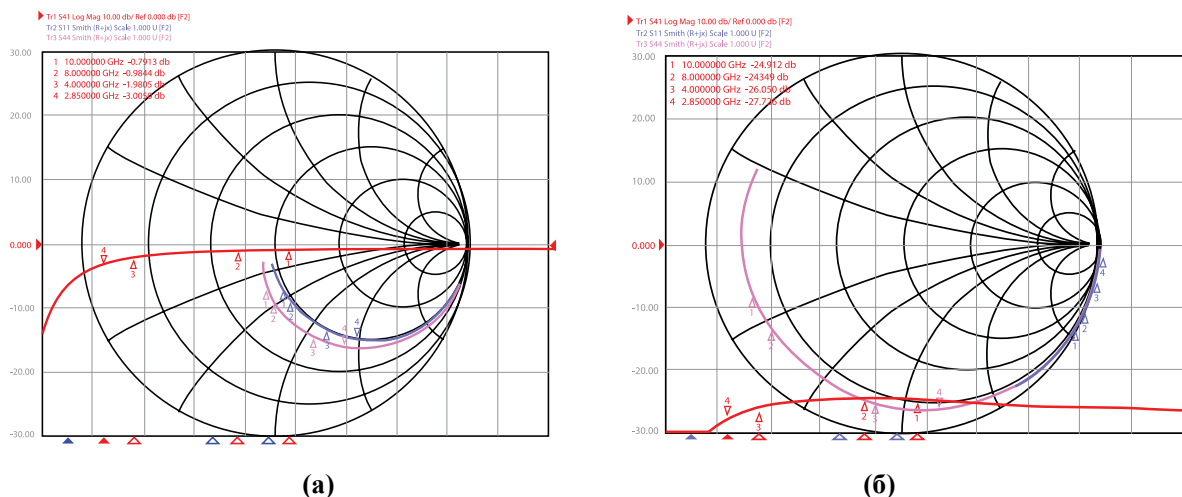


Рис. 5

Зависимость параметров S_{11} , S_{22} (на диаграмме Смита) и S_{21} (Декартовы координаты) от частоты: а) для включенного состояния; б) для выключенного состояния

Заключение

Рассмотрены особенности зависимости СВЧ параметров от режима переключателя, изготовленного по C³MOS технологии на AlGaIn/GaN гетероструктурах с контактами с ёмкостной связью, в диапазоне рабочих частот 0,8-20 ГГц. Для SPST ключа с шириной канала последовательного переключающего элемента 1 мм получены начальные потери $\leq 0,26$ дБ. SPST ключ с последовательным и параллельным переключающими элементами имеет потери менее 1 дБ и обеспечивает развязку более 25 дБ в широкой полосе частот при мощности переключения до 3 Вт (ширина канала 0,27 мм). Переключатели с большей шириной переключ-

чающих элементов линейно переключают большие уровни мощности.

Результаты измерений и их анализ, на основе использования тестовых значений для отдельных элементов, позволяют сделать заключение о возможности изготовления SPST переключателей размером 1-3 мм² и плотности мощности переключения до 20 Вт/мм.

Литература

1. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: Техносфера, 2011.
2. Pat Hindle The State of RF and Microwave Switches // Microwave Journal, vol. 53, no. 11, pp. 20-36, November 2010.

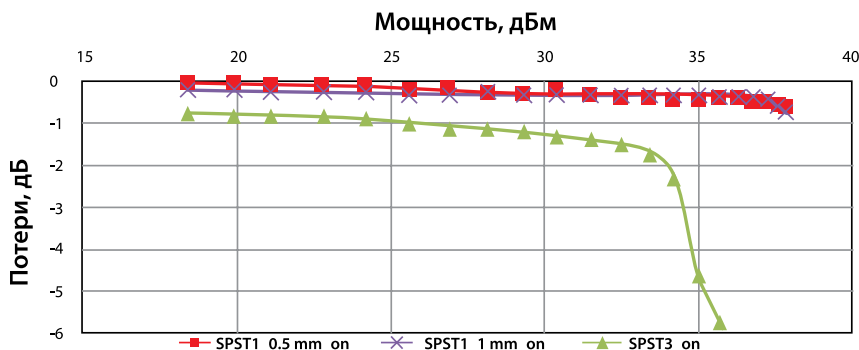


Рис. 6

Амплитудная характеристика переключателя, измеренная на 9 ГГц, для ширины канала последовательных переключающих элементов 0,5 мм (■), 1,0 мм (◆) и последовательно-параллельного соединения переключающих элементов 0,27 мм (▲)

3. Koudymov A. et al. Low-Loss high power RF switching using multifinger AlGaIn/GaN MOSHFETs // IEEE Electron Dev. Lett., vol. 23, no. 8, 2002.
4. Simin G. et al. III-nitride transistors with capacitively coupled contacts // Applied Phys. Lett., 2006, 89 p.
5. Adonin A. S., Evgrafov A. Yu., Minnebaev V. M. and etc. Microwave C³HFET AlGaIn/GaN switch utilizing contacts with capacitive coupling // CriMiCo'2015 Org. Com. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788.
6. Адонин А. С., Евграфов А. Ю., Миннебаев В. М. и др. СВЧ ключ без омических контактов на AlGaIn/GaN гетероструктурах // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – № 4 (238). – С. 6-14.
2. Pat Hindle The State of RF and Microwave Switches // Microwave Journal, vol. 53, no. 11, pp. 20-36, November 2010.
3. Koudymov A. et al. Low-Loss high power RF switching using multifinger AlGaIn/GaN MOSHFETs // IEEE Electron Dev. Lett., vol. 23, no. 8, 2002.
4. Simin G. et al. III-nitride transistors with capacitively coupled contacts // Applied Phys. Lett., 2006, 89 p.
5. Adonin A. S., Evgrafov A. Yu., Minnebaev V. M. and etc. Microwave C³HFET AlGaIn/GaN switch utilizing contacts with capacitive coupling // CriMiCo'2015 Org. Com. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788.
6. Adonin A. S., Evgrafov A. Yu., Minnebaev V. M. et al. *SVCH klyuch bez omicheskikh kontaktov na AlGaIn/GaN geterostrukturakh* [AlGaIn/GaN microwave switch with capacitively-coupled contacts]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2015, № 4 (238), pp. 6-14.

References

1. Vasiliev A. G., Kolkovsky Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *SVCH pribory i ustroystva na shirokazonnykh poluprovodnikakh* [Microwave wide bandgap semiconductor devices]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011, 416 p.